

САФОНОВА ЕКАТЕРИНА ВИКТОРОВНА

ТЕПЛОСТОЙКИЕ СВЧ ДАТЧИКИ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ РЕЖИМОВ
ГОРЕНИЯ

Специальность **05.11.13** - Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Е. Сафонов

Казань 2003

Работа выполнена на кафедре
радиоэлектронных и квантовых устройств Казанского государственного
технического университета им. А.Н. Туполева

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,
Болознев Виктор Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Солдаткин Владимир Михайлович

кандидат технических наук, доцент
Бугаенко Адольф Георгиевич

Ведущая организация: ОКБ «Сокол», г. Казань

Защита состоится 25 апреля 2003г. в 15 часов на заседании
диссертационного совета Д212.079.04 при Казанском государственном
техническом университете им. А.Н. Туполева в зале заседаний ученого
Совета по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского
государственного технического университета им. А.Н. Туполева

Автореферат разослан 21 мая 2003г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент



Козлов В.А.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы определяется нарастающим стремлением энергомашиностроителей, инженеров и ученых, к повышению функциональных, экономических и экологических характеристик тепловых энергетических установок. Значительное внимание здесь уделяется оптимизации режимов горения и предотвращению развития аномальных режимов, приводящих к участвующим авариям и катастрофам. Последнее обстоятельство особенно значимо для авиационной и космической техники.

Существующие методы контроля режимов не обеспечивают полноты и достоверности информации. Но главным их недостатком является инерционность - результаты измерения становятся известны поздно. Это одна из причин упомянутых аварий.

Одним из наиболее перспективных методов считается СВЧ зондирование **внутрикамерного** пространства. Здесь исследования идут в двух направлениях:

- установление зависимости между электрофизическими параметрами плазмы пламени (электронной концентрацией, частотой соударений, структурой электромагнитного поля, собственным радиоизлучением) и рабочими характеристиками тепловой энергетической установки (ТЭУ).
- создание измерительных **систем**, обеспечивающих невозмущающий и оперативный контроль.

Первое из направлений реализуется в работах теплофизиков ряда стран: России, Белоруссии, Италии, США.

Особенностью второго направления является создание средств невозмущающего и оперативного контроля режимов ТЭУ в реальных эксплуатационных условиях с помощью датчиков электрофизических параметров. Здесь недопустимо существенное изменение конструкции камеры сгорания и размещение датчиков в ее объеме. Датчики должны обладать высокой эрозионной устойчивостью, а формируемые им сигналы - слабой зависимостью от многофакторного воздействия процесса горения. И здесь работы ведутся во многих странах (Австрия, США и др.) Значительный вклад в работы по второму направлению внесли ученые **КГТУ** (Р.А.Гафуров). В частности были созданы и экспериментально опробованы СВЧ **автодинные** измерители, которые по большинству функциональных характеристик удовлетворяли требованиям энергетиков. Основным недостатком датчиков являлась низкая теплостойкость. Нагрев датчика приводил не только к очень высокому уровню погрешностей, но и являлся причиной частого выхода из строя.

Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка принципов построения СВЧ датчиков параметров пламени в (транспортных) ТЭУ, обеспечивающих невмешательство в контролируемый процесс горения и сохраняющих точность контроля при нагреве со стороны контролируемого рабочего тела.

Задачи исследований:

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

- /1. Анализ электрических процессов в датчиках, отыскание передаточной функции,
2. Выявление структуры температурных полей в теле датчиков при статическом, **флуктуационном** и стартовом нагреве его огневой поверхности
3. Оценка влияния температуры на надежность и погрешности измерения в трех названных выше режимах нагрева,
4. Выработка технических предложений, позволяющих сохранить **работоспособность** датчиков и снизить температурную погрешность с применением схемных и конструктивных методов; экспериментальная оценка работоспособности предложенных схмотехнических и конструктивных решений.

Методы исследования и достоверность. Для анализа использованы классические методы теории колебаний, применяемые в радиотехнике и теории **теплопереноса**. Полученные аналитические выражения по структуре сходны с известными, а в предельных случаях совпадают с ними.

Ряд аналитических соотношений проверен экспериментально. Результаты анализа электрических процессов в датчиках соответствуют экспериментам в проведенных ранее исследованиях.

Практическая ценность и **реализация**. Конкретные примеры схем и конструкций СВЧ **автодинных** датчиков ориентированы на применение в авиационных и космических двигателях. Для применения в поршневых двигателях достаточно изменить поперечный размер датчика.

Результаты работы в виде опытного образца датчика использованы в лаборатории промышленных горелок КГТУ им. А.Н. Туполева при доводке газовой горелки Г-18 и ее промышленных испытаний.

Методика повышения теплостойкости датчиков технологических процессов использована в металлургической промышленности в ГПВО «Тяжпром-экспорт».

Разработанный СВЧ датчик внедрен в учебный процесс РТТ в лабораторную работу «Исследование **автодинного** приемопередатчика СБРЛ» по дисциплине «Генераторы СВЧ и КВЧ» в КГТУ им. А.Н. Туполева.

Научная новизна. В работе получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной и выносимые на защиту:

1. Изучена динамика автодина с многозвенным резонатором и антенной, излучающей в материальную среду с переменной диэлектрической проницаемостью.
2. Найдены условия устойчивости основного автодинного режима и неустойчивости паразитных режимов. Найдено сочетание параметров многозвенного резонатора (МЗР), обеспечивающее соблюдение этих условий.
3. Выявлена структура температурных полей в теле датчика при статическом, **флуктуационном** и быстром плановом нагреве, происходящих соответственно при стационарном режиме и его изменении (например, при запуске ТЭУ). На

этой основе предложены конструктивные решения, обеспечивающие теплозащиту и функционирование активного элемента (диода Ганна или **лавинно-пролетного** диода **ЛПД**).

4. Вычислены **статическая**, случайная и динамическая температурные погрешности. Предложены и проанализированы технические решения, снижающие случайную погрешность.

5. Созданы экспериментальные модели **датчиков**, в соответствии с полученными аналитическими соотношениями. Проведены эксперименты, подтвердившие повышенную теплостойкость датчиков.

Вклад автора. Научные данные, изложенные в диссертации, получены лично автором. Положения и выводы, выносимые на защиту, как и проведенный эксперимент, принадлежат автору.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на **Yakovkin Memorial 4th International Symposium on Surface Waves in Solid and Layered Structures**, 1998 **International Symposium on Acoustoelectronics**, Frequency control and Signal generation and **International Conference for Young Researchers on Acoustoelectronic and Acoustooptic Information Processing** **St.Peterburg-Kizhi-Valaam-St.Peterburg**, Russia, 1998; Joint meeting of the 13th European frequency and time forum and 1999 **Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) international frequency control symposium**, Besancon, France, 1999; на III Всероссийской конференции «Применение дистанционных радиофизических методов в исследованиях природной среды» г.Муром, 1999; Joint meeting of the 14th European frequency and time forum and 2000 **IEEE international frequency control symposium EFTF**, Torino, Italy 2000; на 1-ой **научно-технической конференции** студентов и аспирантов. Радиотехнический факультет к **5-летию** малой радиотехнической **академии**, г. Казань, 2000; 2000 **IEEE/EIA international frequency control symposium and exhibition**, Kansas city, USA, 2000; **Scuola Internazionale Di Fisica "Enrico Fermi"**: "Recent advances in metrology and fundamental constants", **Varena**, Italy, 2000- получен сертификат физика данной школы и фант за лучший стендовый доклад; **International Forum on Wave Electronic and its Applications**, **St.Peterburg-Valaam-Mandrogii-St.Peterburg**, Russia, 2000; Joint meeting of the 15th European frequency and time forum and 2001 **IEEE international frequency control symposium**, Neufchatel, Switzerland, 2001; IV **International Conference for Young Researches Wave Electronics and Its Applications in Information and Telecommunication Systems**, St.Peterburg, Russia, 2001, **-выступление** в качестве председателя на этой же конференции в секции "Acoustoelectronics"; на Научной Технической конференции «Автоматика и электронное приборостроение» Казань, **КГТУ**, 2001; Joint meeting of the 16th European frequency and time forum and 2002 **IEEE international frequency control symposium**, St.Peterburg, Russia 2002; решением Правления Международной Соросовской Программы Образования в Области точных Наук Института Открытого Общества присвоено звание **Соросовского** Аспиранта.

Публикации. По теме опубликовано 15 печатных работ, в том числе 8 статей и 7 тезисов докладов.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы. Дана ее общая характеристика.

В первой главе описаны принципы сверхвысокочастотной диагностики пламен, дан обзор работ в данном направлении, трудности и предпосылки диагностики ТЭУ в эксплуатационном режиме, а также сформулирована цель диссертационной работы.

Во второй главе выявлены условия функционирования датчиков при воздействии пламени и сформулированы требования к схемам и конструкциям, обеспечивающим работоспособность при таких условиях:

- невозмущающий характер контроля, включая отсутствие влияния на процесс горения, малые конструктивные изменения камеры сгорания при установке датчика, достаточная удаленность вторичных приборов.
- слабая зависимость формируемого измерительного сигнала от агрессивных **помеховых** факторов, прежде всего - от интенсивного и неравномерного нагрева датчика.
- оперативность контроля, включая не только быстроту отклика на незапланированные аномалии (**предаварийную** ситуацию), но и удобство вторичной обработки измерительного сигнала в реальном времени.

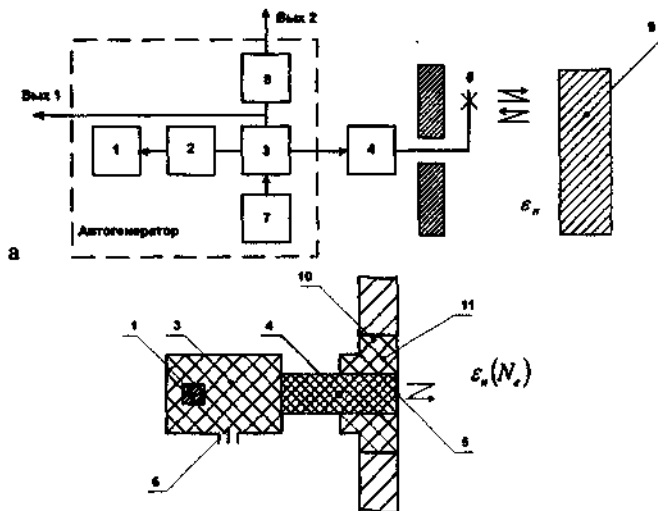
Предпринимаемые ранее и в процессе данной работы попытки удовлетворить **перечисленным** требованиям с помощью одних только конструктивных модификаций известных диагностических систем к успеху не привели. Наилучшим среди предложенных оказался **автодинный** принцип формирования измерительного сигнала:

- преобразование диэлектрической проницаемости плазмы пламени в комплексное сопротивление невыступающей и слабонаправленной антенны.
- последующее преобразование сопротивления в частоту генерации - основной информационный параметр.
- передача сформированного сигнала в приборный отсек.

Применение данного принципа позволило существенно изменить конструкцию и построить компактный модуль, предназначенный для установки в стандартный штуцер на камере РД.

Датчик представляет собой высокочастотный (сверхвысокочастотный) приемопередатчик **автодинного** типа ближней радиолокации с невыступающей (щелевой) антенной. Датчик формирует локальное зондирующее электромагнитное поле и преобразует значение контролируемого параметра в частоту зондирующего колебания.

Исходя из принципа работы датчики пригодны для контроля тех технологических процессов, в которых интересующий параметр имеет однозначную взаимосвязь с диэлектрической или магнитной проницаемостью рабочего тела. Его структура (рис. 2.1.1) включает:



6

Рис.1 Обобщенная структура (а) и конструкции датчика (б)

Позиции на рис.1: 1-активный элемент (АЭ), 3 - резонатор, 5 -антенна (А), 2, 4, 6 - элементы связи резонатора с АЭ, А и Н выходом, 7 -элемент настройки, 8 - фильтр питания, 9 - облучаемый объект (в нашем случае им может оказаться не только плазма пламени, но и противоположная стенка камеры сгорания), 10 - стенка камеры, 11-штуцер, ϵ_n - диэлектрическая проницаемость среды распространения.

Наиболее известен доплеровский автодин, применяемый для измерения скорости движения объекта 9, расположенного обычно в дальней зоне направленной антенны (хотя эта зона является дальней для антенны, но для РЛ она все равно ближняя). Здесь вследствие доплеровского смещения частоты принимаемого сигнала АЭ работает также и в роли смесителя, точнее, преобразователя частоты. Разностная частота проходит через фильтр питания (вых.2). Режим доплеровского автодина может возникать при вибрации противоположной стенки камеры 9.

В другом применении автодинов объект 9 малоподвижен и расположен в ближней зоне антенны. Отраженный сигнал, воздействуя на автогенератор, вызывает статическое смещение частоты, пропорциональное расстоянию до объекта. В наиболее известных случаях (предотвращение столкновений транспортных средств, и охранная сигнализация) диэлектрическая проницаемость среды $\epsilon = 1$ и поэтому во внимание не принимается. Однако автодин может быть использован аналогично рефлектометру, то есть для измерения ϵ , но при условии известности и постоянства расстояния до отражателя.

Наконец в третьем варианте использования автодина сигнал отражается от антенны. Эффект связан с изменением сопротивления **антенны**, излучающей в материальную среду, отличную по свойствам от вакуума. В применении к **однокаскадным** передатчикам эффект известен давно. Довольно хорошо изучен режим автогенераторов, а также предложен ряд технических решений, по управлению частотой генерации (как модуляции, так и стабилизации), основанных на имитации данного эффекта.

Эскиз обобщенной конструкции такого **автодинного датчика, названного** нами также **антенно-генераторным** модулем (**АГМ**), со многими условностями, вызванными стремлением к обобщению, показан на **рис.1 (б)**.

В отличие от двух первых применений автодина здесь отражение (очень частичное) сигнала от антенны является условием работы датчика. Поэтому антенна заведомо рассогласована с **АГ** при любых значениях диэлектрической проницаемости. В нашем случае материальной средой является плазма пламени, зависящая от электронной концентрации N_e . Антенна ненаправленная, чему способствуют ее малые размеры, напряженность поля быстро убывает с расстоянием. Поэтому электронная концентрация сказывается на свойствах антенны вблизи ее **раскрыва**, то есть в основном в пристенной области. Причем форма этой области подобна ближней зоне антенны. С другой стороны в силу структуры пламени в потоке распределение N_e в указанной области неравномерно, по мере удаления от стенки концентрация растет. Поэтому **автодинный** эффект обусловлен некоторой усредненной концентрацией по ближней зоне антенны.

Огневая поверхность датчика (то есть конструктивные элементы антенны) подвержена агрессивному воздействию пламени. Часть этих воздействий - термоэрозию и осаждение сажи удастся ослабить защитной диэлектрической радиопрозрачной пленкой. Однако нагрев ослабить невозможно. Большая часть датчика на **рис. 1(б)** слева находится во внешней и достаточно холодной среде. Тепловой поток, вызванный перепадом температур внутри и вне камеры сгорания, достигает активного элемента, но температура последнего существенно ниже, чем у антенны. Степень этого понижения сильно зависит от схемы и конструкции датчика, а главным образом - от размеров резонатора и элементов связи (не показанных на **рис. 1(б)**). С другой стороны длина резонатора определяется зондирующей частотой, а та в свою очередь - электронной концентрацией:

$$f > f_{\text{н}} = \sqrt{bN_e} \quad \text{О)}$$

Подчеркнем, что росту энергетической эффективности ТЭУ сопутствует и повышение температуры, и концентрации электронов. Первое требует удлинения резонатора, второе - его укорочения. Дополнительное затруднение здесь вносит диэлектрическое заполнение резонатора (ϵ_p). Оно не только предотвращает проникновение продуктов сгорания внутрь датчика (в резонатор), но, как мы увидим ниже, является важным силовым элементом всей конструкции.

Ясно, что $\varepsilon_p > 1$, что приводит к физическому укорочению резонатора (в сравнении с пустотелым). **Наконец**, с позиций вышесказанного теплопроводность диэлектрика и проводящих материалов стенок резонатора являются важными **теплофизическими** характеристиками. Это резко ограничивает номенклатуру пригодных для наших целей диэлектриков.

Основные рабочие характеристики датчика:

- Частотный диапазон
- Передаточная функция,
- Диапазон контроля концентрации электронов

$$N_e \in (N_{e_{\min}}, N_{e_{\max}})$$

- Чувствительность
- Нелинейность
- Инерционность
- Уровень собственных шумов и отношение **сигнал/шум**, динамический диапазон
- Мощность (достаточная для приведения в действие вторичных приборов)
- Надежность

Уравнение частоты генерации ω :

$$X_p(\omega, T) + K_2 X_d(\omega, T) + K_4 X_A(\omega, \varepsilon, T) = 0 \quad (2)$$

где X_p - реактивное сопротивление, резонатор, диод, антенна соответствуют позициям 3, 1 и 5 (рис. 1(б)), $K_{2,4}$ - коэффициенты включения, ε - контролируемая ДП, T - обобщенная **помеха**, отображающая многофакторное воздействие со стороны рабочего тела ракетного двигателя РД (пламени).

В линейном (Тейлоровском) приближении частота:

$$\omega(\varepsilon, T) = \omega_0 + \Delta\omega_p(T) + \Delta\omega_d(T) + \Delta\omega_A(\varepsilon, T) \quad , \quad (3)$$

где ω_0 - номинальная частота (в воздухе), $\Delta\omega_{p,d}(T)$ - смещение частоты, вызванное прямым воздействием помехи на резонатор и диод и

$$\Delta\omega_A(\varepsilon, T) \approx \Delta\omega_A(\varepsilon) + \Delta\omega_A(T), \quad (4)$$

причем первое слагаемое есть полезный эффект, то есть передаточная функция датчика в явном виде.

Выбор номинальной частоты исходит из условия, что минимальное значение $\omega_{\min}(\varepsilon, T)$ должно превосходить плазменную (критическую) частоту:

$$\omega_{\min}(\varepsilon, T) > \omega_{\text{пл}} = 2\pi\sqrt{\varepsilon N_{\text{макс}} - \nu^2}, \quad (5)$$

($b \approx 80(\text{Гц}^2 / \text{м}^2)$).

Для авиационных и космических РД $N_{\text{max}} > (10^6 \dots 10^{10}) \frac{1}{\text{м}^3}$ и поэто-

му $f = \omega / 2\pi > (2 \dots 3) \Gamma \text{ТГц}$. Таким частотам соответствует длина четвертьволнового резонатора менее **(40...25)мм**, следствием чего является недопустимо высокая температура датчика в целом, приводящая к тепловому разрушению генераторного диода. Нагрев антенны достигает **600 °C** и более.

Крутизна передаточной характеристики:

$$G[\varepsilon(N_s)] = \frac{d[\Delta\omega(\varepsilon)]}{dN_s} = \frac{d\varepsilon}{dN_s} \cdot \frac{dX_A}{d\varepsilon} \cdot \frac{d\Gamma_A}{dX_A} \cdot \dot{K}_A \cdot \frac{d\omega(X_p, X_A)}{d\Gamma_A}, \quad (6)$$

Дальнейшее содержание второй главы состоит в отыскании явного вида зависимости $G[\varepsilon(N)]$ и включает исследование антенны, резонатора и автодин-на в целом.

По условиям применения в датчиках используются невыступающие и слабонаправленные антенны, преимущественно щелевые, конструкции которых известны.

Соответствующая часть работы свелась к выбору оптимальной для нашего случая аппроксимации, поскольку антенны работают в нештатном, **несогласованном** режиме.

В традиционных конструкциях компактных автодинов диод отдален от антенны (а у нас это и огневая поверхность) на расстояние в четверть длины волны, то есть при наших частотах не более 40мм. Предлагается использовать многозвенный резонатор (**МЗР**), представляющий собой отрезок волновода с отражающими преградами через полволны. Также резонаторы применяются в КВЧ диапазоне, но их **свойства**, существенные для нашего применения, не изучены.

МЗР решает следующие задачи:

- физическое **удлинение** расстояния между огневой поверхностью и диодом, приводящее к снижению рабочей температуры последнего и уменьшению таким путем температурных флуктуации частоты;
- обеспечение устойчивости **автодинного** режима и предотвращение возбуждения на низких частотах,

Найден полный эквивалентный коэффициент отражения в МЗР как функция парциальных коэффициентов и числа звеньев.

$$\dot{\Gamma}_n = \dot{\Gamma}_1 - \frac{\psi_1^2}{\dot{\Gamma}_1 - \frac{1}{\dot{\Gamma}_2 - \frac{\psi_N^2}{\dot{\Gamma}_N - 1/\dot{\Gamma}_A}}} \dots \dots \dots (7)$$

где $\psi^2 = 1 - |\Gamma|^2$, $\dot{\Gamma}_A = \Gamma_A \exp(j\phi_A)$.

При $\Gamma \ll 1$ здесь можно учесть только первое отражение падающей волны, поскольку переотраженная волна пропорциональна $\Gamma^{(2m+1)}$, где m - номер переотражения, ее вклад очень слабый. Тогда

$$\Gamma_n \approx \Gamma [1 + \psi^2 + \psi^4 + \psi^{2(N-1)}] + \Gamma_n \psi^{2N} = \Gamma \sum_{k=0}^{N-1} \psi^{2k} + \Gamma_n \psi^{2N} \quad (8)$$

С ростом Γ и N влияние антенны уменьшается пропорционально

$$\beta = |\Gamma_a| / \Gamma_p = \frac{\Gamma_a \psi^{2N}}{\sum_{k=0}^{N-1} \psi^{2k}} = \alpha^2 |\Gamma_a| \quad (9)$$

Величину α_a рассматриваем, как коэффициент включения антенны в резонатор

$\alpha_a^2 = \frac{\psi^N}{\sum_{k=0}^{N-1} \psi^{2k}}$. Графически зависимости $\Gamma(N, \Gamma)$ и $\alpha_a(N, \Gamma)$ представлены на рис.2.

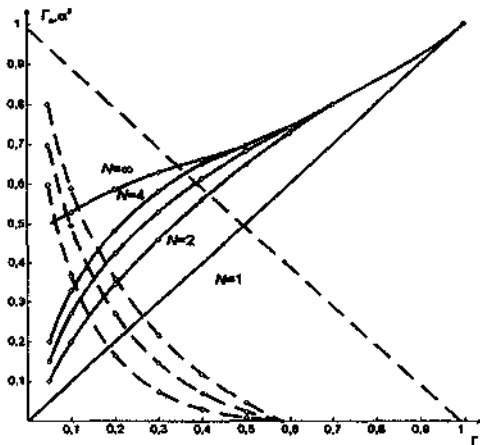


Рис.2 Полный коэффициент отражения и коэффициент включения

Показано, что с электродинамических позиций целесообразен трех-четырехзвенный резонатор при малом парциальном коэффициенте отражения. Вычислена добротность МЗР, весьма существенная при формировании автодинного эффекта:

$$Q_H \approx 1 / [1 - \sqrt{\sum_{i=1}^N (\Gamma \psi^{2(i-1)})^{N+1} + \psi^{2N} \cdot \Gamma^2}] \quad (10)$$

Основная рабочая функция датчика основана на автодинном эффекте: изменение частоты автоколебаний под влиянием отражения генерируемого сигнала от несогласованной антенны.

В работе уделено внимание двум вопросам:

1) Отысканию явной функциональной зависимости автодинного

эффекта от параметров пламени,

2) Изучению устойчивости **автодинного** режима.

По первому вопросу исследование свелось к вычислениям, **базирую-**щимся на так называемом втором условии **Куракавы**. Полученные результаты - передаточная функция, в том числе с аргументом ε_n , - похожа (но не совпадает в деталях) с классической. Линейный участок достаточно протяженный, а рабочая точка при $\varphi=0$ достигается выбором длины фидера.

$$\frac{d\Delta\omega}{d\varepsilon} = -\frac{\omega}{2Q_3} \left[\frac{d\Gamma_A}{d\varepsilon} \sin \varphi_s + \Gamma_A \frac{d \sin \varphi_s}{d\varepsilon} \right] \quad (11)$$

Формула (11) отражает чувствительность (крутизну) датчика

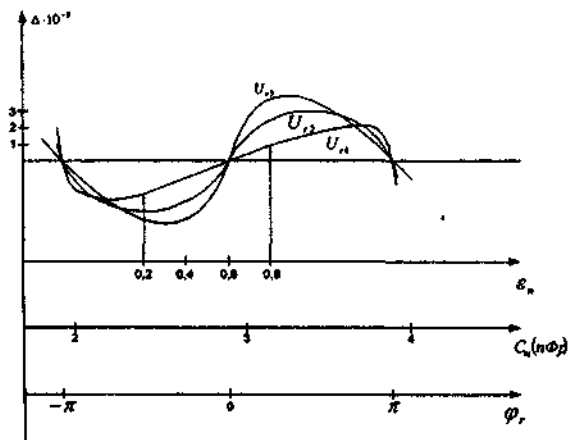


Рис.3 Передаточная функция автодинного датчика

Неустойчивость автодинного режима стимулируется удлинением **резонатора** в сочетании с особенностью отражения волны от антенны. Первый из эффектов известен в автодинах **КВЧ** диапазона. Анализ устойчивости проведен с привлечением третьего условия Куракавы.

$$\frac{dR}{dl_d} \cdot \frac{dX}{d\omega} - \frac{dR}{d\omega} \cdot \frac{dX}{dl_d} > 0 \quad (13)$$

Наиболее опасной представляется частота, для которой общая длина резонатора является четвертьволновой. Для такой частоты плазма пламени электропроводна, антенна **короткозамкнута** и коэффициент отражения от нее - единица.

$$\omega_r \approx \frac{(2r-1) \cdot 2\pi\nu_r}{(L_p + l_{N+1})}, \quad (r=1,2,3) \quad (14)$$

То есть резонатор гораздо добротнее и условия самовозбуждения более благоприятны. Однако парциальные отражения от преград здесь не **сфазированы**, что отображает векторная диаграмма на рис.4.

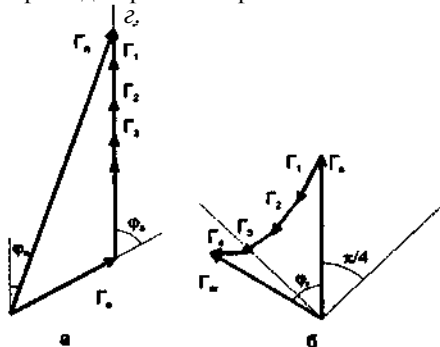


Рис. 4 Векторные диаграммы напряжений в автодине на **основной** (а) и одной из паразитных частот (б)

Показано, что паразитный режим неустойчив если групповая фаза отражения больше $|\pi/4|$. Полученные соотношения указывают путь реализации такого режима выбор параметров: число звеньев, коэффициент отражения, длины резонатора.

Проведенный во второй главе анализ в детерминированном приближении показал функциональную осуществимость **автодинных** измерителей **ДП** пламени, приемлемую линейность передаточной характеристики, а при **соблюдении** выявленных мер - и устойчивость.

В третьей главе проведена оценка влияния нагрева датчиков на точность контроля параметров.

Воздействие пламени на рабочую поверхность датчика вызывает комплекс помех, среди которых эрозия антенны и осаждение сажи на ее **поверхности**, электрические и электромагнитные явления, а также вибрации. Однако наиболее сильная помеха и наиболее существенная погрешность связана с **неравномерным** и **нестационарным** нагревом, при средней температуре на **огне**-вой поверхности до **600 °C** и более.

Выделены три характеристики **ситуации**:

- квазистатический нагрев и порожденная им систематическая **по**-грешность.
- **флуктуационный** нагрев, вызванная им нестабильность частоты и - случайная погрешность.
- быстрый нагрев при изменении режима горения, например при старте, и динамическая погрешность.

В соответствии с представлением автора о происходящих процессах **по**-строена тепло электрофизическая модель датчика (рис. 5).

где n - коэффициенты теплоотдачи вовне, $\Delta T_{01} = T_1 - T_0$, $A_{1,2} = (1 \mp n) \exp(\mp mL)$

Остановимся на температуре диода:

$$T(L) = T_0 + \Delta T_{01} / ch(mL) \leq T_{\max} \approx (70...80)^\circ\text{C} - \text{это условие функционирования дат-}$$

чика. Расчетные значения нагрева диода приведены в табл. 1. В верхней части таблицы приведены датчики с резонаторами традиционной конструкции, но с различной **толщиной** стенок, и с диэлектрическим заполнением. В нижней половине таблицы резонатора из диэлектрика с тонким (толщиной скин-слоя 4.... 10 мкм) покрытием. Для теплозащиты диода существенное значение имеет применение МЗР, позволяющее увеличить длину резонатора L , не снижая рабо-
чую частоту.

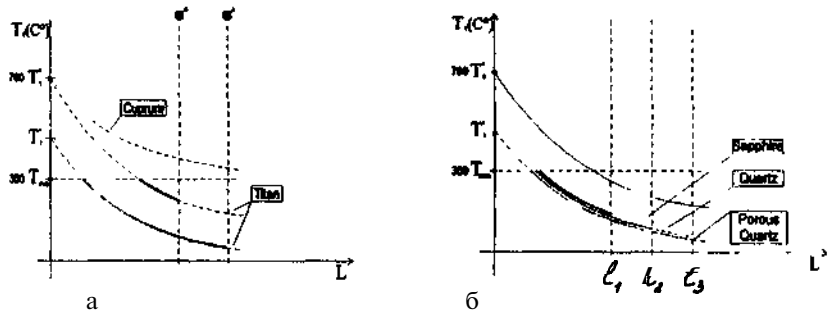


Рис.5 Зависимость нагрева диода от материалов резонатора с преобладанием в конструкции металлических (а) и диэлектрических (б) деталей

Материалы	$m\left(\frac{1}{\text{м}}\right)$	$ch(mL)$	$T_{\text{д}} \text{ при } \Delta T = 600^\circ$	Безопасная длина резонатора мм
Медь*	6...9	1,2...1,4	430	500
Медь**	15...22	2,4...4,6	170	150
Титан*	14...21	2,2...4,1	190	170
Титан**	28...40	7,4...27	35	65
Сапфир	31...46	11...50	10	<50
Кварц плавленый	80...120	$> 10^3$	<1	-
Кварц пористый	200...300	$> 10^5$	$< 10^{-2}$	-

Таблица 1

Квазистатическое температурное смещение частоты от продольного расширения резонатора составляет:

$$(\Delta_1 + \Delta_2) = \left(K_f + \frac{\beta_s}{2}\right) \cdot \frac{[1 - \exp(mL)]}{mL} \cdot \Delta T_{01}, \quad (16)$$

от поперечного расширения:

$$\Delta_3 = \frac{C}{2\alpha L \sqrt{\epsilon_p}} \cdot \frac{Nsh(\alpha L)}{\alpha [ch(\alpha L) - (\gamma_3/c)sh(\alpha L)]}, \quad (17)$$

где α, γ - электрические постоянные распространения и затухания,

$$N = \frac{1}{4} \ln \frac{1 + \beta_e T_1}{1 + \beta_e T(L)} \quad \text{или} \quad N = M[\beta_e, T_1, T(L)],$$

С - скорость света, смещение от на-

грева диода и антенны представлены графически рис. (б):

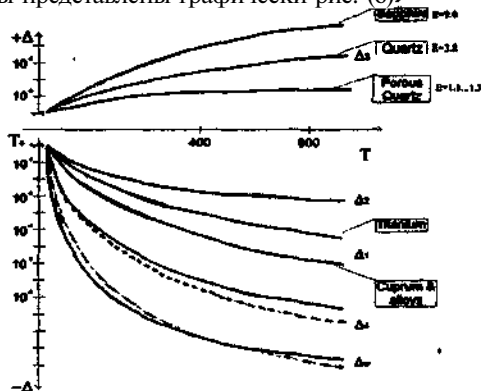


Рис.6 Смещение частоты генерации при статическом нагреве резонатора

Таким образом, нагрев очень существенно изменяет среднюю частоту, систематическая погрешность **велика**, но может быть **учтена**, поскольку T , известна.

Для датчика с **МЗР** влияние нагрева антенны на частоту с ростом числа звеньев ослаблено несущественно, остальные факторы ослаблены существенно, что упрощает учет систематической погрешности (рис.7).

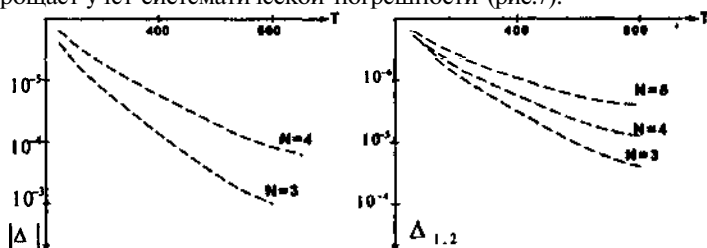


Рис.7 Зависимость частоты датчика от температуры при разном числе звеньев в МЗР: влияние антенны (а), удлинения резонатора Δ_1 и изменения диэлектрической проницаемости Δ_2 (б).

В отличие от статического случая при **флуктуационном** нагреве **изотермические** поверхности смещаются, в теле датчика распространяются температурные волны. Закон распространения волны **j-той** частоты.

$$T_j(x,t) = \frac{T_1}{\sqrt{V_1 + \frac{2p_l}{H} \left(1 + \frac{p_l}{H} \cdot \frac{a}{a}\right)}} \times \exp(-p,x) \cos[\Omega x - (p,x + \psi_n)] =$$

$$= T(x,t) = T \cdot \Phi(p) \cdot F_1(p,x) \cdot F_2(\Omega, p, x, t), \quad (18)$$

где $p = \sqrt{\Omega/2a(1/m)}$ - постоянная затухания, она же постоянная распространения (волновое число) a - коэффициент **температуропроводности**, H - коэффициент теплоотдачи от огневой поверхности, $\psi_n = \arccos(1 + H/p)$.

Таким образом, имеют место скачки амплитуды и фазы температурной волны на границе сред, затухание волны и разная скорость распространения волн различных частот.

Исходный спектр процесса $T_1(t)$ достаточно **широк**, но в низкочастотной (< 1 Гц) части флуктуации подавлены действием системы управления ТЭУ. С другой стороны по мере распространения в теле датчика более **существенно** подавлению подвергается высокочастотная часть **флуктуационного** спектра. Тело датчика работает как фильтр нижних частот. Более всего на коэффициент фильтрации влияет температуропроводность. Коэффициенты фильтрации для антенны и резонатора соответственно равны $\Phi(p)$ и

$$K_i[p(\Omega), m, n] = \Phi[p(\Omega)] \cdot \frac{U_1[p(\Omega), m, n] - U_2[p(\Omega), m, n]}{ch(ml) - nsh(ml)} = \Phi(p)M(p, m, n)$$

$$где U_{1,2}[p(\Omega), m, n] = \frac{1 \pm n}{m \pm p} \times \{1 - \exp[\mp(m \pm p)t]\} \exp(\pm ml) \quad (19)$$

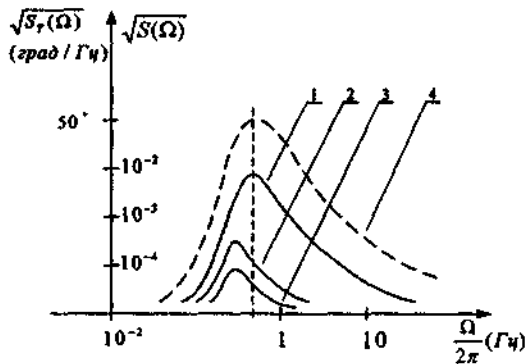


Рис.8 Спектральные плотности температурных флуктуации в резонаторе и антенне

Изменение поперечных размеров и диод влияют на этот процесс несущественно. На рис.8 показаны спектры флуктуации исходной температуры пламени (кривая 4), а также антенны (1), и резонаторов из плавленого (2) и пористого (3) кварца.

При отыскании результирующей спектральной плотности $S_f(\Omega)$ учтена корреляция случайных процессов в антенне и резонаторе. По грубой оценке коэффициент корреляции:

$$B_{A_{ij}} \approx \sum_{r=1}^{r=R} \exp[-2(r-1)] - \sum_{r=1}^{r=R} \exp[-2r] \sim 0,9 \quad (20)$$

$R = L/\lambda_j$ - число **волн j-той** частоты по длине **резонатора**. Определенную роль в нестабильности частоты **датчика**, то есть и случайной погрешности играет антенна, что определяет одно из главных направлений совершенствования **теплозащитных** свойств датчика.

Четвертая глава посвящена разработке термостойких датчиков и эксперименту.

При разработке ставились две задачи:

- снижение **флуктуационной** погрешности,
- повышение надежности контроля путем улучшения теплозащиты диода.

В дополнение к использованию МЗР здесь рассмотрено еще два технических предложения:

- **термокомпенсированная** биметаллическая **КЩА**.
- выполнение силовых элементов конструкции датчика из пористых диэлектриков.

Первое предложение развивает идею известной биметаллической антенны. Его физическая основа состоит в том, что длина и ширина щели при **нагреве** изменяют электрические параметры в противоположные стороны. В **прототипе** это сделано для согласованной антенны и результат представлен конкретным числовым соотношением.

В нашем случае стабилизируется коэффициент отражения от **несогласованной** антенны, а соотношения найдены в общем виде.

Формулировка задачи: изменение вещественной и мнимой частей коэффициента отражения не должны превышать допустимых, при этом варьируемые параметры - K , лежат в естественных пределах для электротехнических металлов и сплавов.

$$\begin{aligned} |d\Gamma/dT| \leq \delta = D/\Delta T \\ \frac{d \operatorname{Re} \Gamma(T)}{dT} \leq \delta_1 \quad \text{и} \quad \frac{d \operatorname{Im} \Gamma(T)}{dT} \leq \delta_2. \end{aligned} \quad (21)$$

После подстановки ранее найденных значений коэффициента отражения $\Gamma(r)$ условие термокомпенсации сведено к системе неравенств:

$$\frac{Y_1 K_1 - \delta_3 + \mu_1}{Y_1} \leq K_2 \leq \frac{Y_1 K_1 + \delta_3 + \mu_1}{Y_2}$$

$$\frac{Y_3 K_1 - \delta_4 + \mu_2}{Y_4} \leq K_2 \leq \frac{Y_3 K_1 + \delta_4 + \mu_2}{Y_4} \quad (22)$$

$$K_{\text{мин}} \leq K_{1,2} \leq K_{\text{макс}},$$

$$Y_{1,2} = R_1 v_{2,1} \pm R_2 \xi_{1,2}, \quad Y_{3,4} = -R_3 v_{1,2} \mp \omega^2 R_5 \xi_{1,2}.$$

$R_{1,3}$ (Ом/град) - функции электрических **проводимостей** антенны, входящих в коэффициент отражения, $v_{1,2}$ (безразмерна) - функция конструктивных параметров антенны, $\delta_{3,4}$ - приведенные допустимые погрешности, $\mu_{1,2}$ - погрешности **Тейлоровского** приближения, $K_{1,2}$ - коэффициенты линейного расширения, $K_{\text{мин}}, K_{\text{макс}}$ - граничные **значения** коэффициентов для огнестойких и экономически доступных электромеханических металлов.

Результаты решения неравенств представлены графически (рис.9) на трех осях с аргументом K_1 , разрешенные неравенством (22) области выделены штриховкой (красной и синей) и желтым цветом. Область пересечения трех неравенств (то есть ее решение) имеет волнистую штриховку, наличие металла (сплава) с K_7 в этой области создает возможность построения термокомпенсированной антенны со значительным и равномерным по частотному диапазону снижением **флуктуационной** погрешности. Расчетные примеры подтверждают реализуемость антенны, косвенно это подтверждено и существованием **прото**-типа.

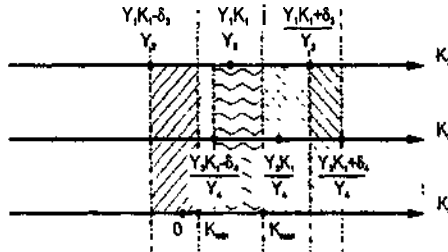


Рис.9 Графическое решение системы неравенств

Другой задачей теплозащиты является построение резонатора. Здесь подбор материалов исходит из двух требований:

- теплозащита диода,
- снижение уровня флуктуации частоты, особенно в окрестности десятков герц.

Одновременно оценена конструкция резонатора в виде диэлектрического бруска или стержня с напыленными проводящими поверхностями (здесь пришлось дополнить анализ главы 3), толщина которых в подобных технических решениях равна или несколько превышает толщину скин слоя.

Критерием достаточности теплозащиты выбрано произведение $\eta\varepsilon$, поскольку теплопроводность и диэлектрическая проницаемость влияют на длину противоположно.

$$\eta\varepsilon_p < \frac{\alpha\lambda^2}{8R[\operatorname{arccch}(\Delta T_{01}/\Delta T_{\text{дон}})]^2} \quad (23)$$

$$\eta\varepsilon_p < \frac{\alpha C}{8RbN_s[\operatorname{arccch}(\Delta T_{01}/\Delta T_{\text{дон}})]^2} \quad (24)$$

где $\Delta T_{01} = (T_1 - T_0)$, $\Delta T = (T_{\text{дон}} - T_0)$.

Наилучшие показатели у пористых керамик и стекол. Нанпыленный **проводник** толщиной в скин-слой способствует (хотя и в небольшой степени) росту **теплопереноса**, что ужесточает эти соотношения на 5...10%. Выигрыш же у традиционных конструкций по температуре диода — более сотни градусов.

Флуктуационная температурная волна в таком резонаторе ослабляется в сто тысяч раз при $f = 1$ Гц и $X = 1$ см.

В реально осуществленную программу эксперимента вошли этапы:

- изготовление и опробование двух датчиков, модификация газовой горелки, оценка пространственной чувствительности датчика (ближней зоны антенны).
- измерение «холодной» чувствительности, т.е. крутизны передаточной характеристики.
- **исследование** рабочей характеристики.
- оценка зависимости частоты от температуры.

Пространственная область контроля достигает оси (пламенного) горящего потока.

Чувствительность датчика несколько ниже, чем в результатах предшественника (**А. Чабдаров**).

При исследовании теплостойкости изменение температуры датчика достигалось изменением режима горения. Температура стенки камеры, контролируемая термодатчиком, лежала в диапазоне от 400 до 2500С. Датчик сохранил работоспособность, которая отмечалась по реакции на впрыск в пламя порошка алюминия.

3. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Установлены аналитические зависимости, связывающие исходный косвенный параметр диэлектрическую проницаемость «холодного» датчика с частотой выходного **сигнала**, то есть найдена передаточная функция датчика. Результаты находятся в согласии с ранее проделанными и полученными в данной работе экспериментальными исследованиями. Датчик обеспечивает высокий уровень сигнала (по мощности), необходимый динамический диапазон по входу и выходу.

Определены условия устойчивости рабочего режима. Ввиду конкуренции основного и ряда паразитных режимов генерации (как с более высокими, так и

с более низкими частотами) меры по обеспечению устойчивости сопряжены с подавлением последних.

2. Выявлены и описаны структура температурных полей и механизмы воздействия на измерительный сигнал статического, **флуктуационного** и динамического нагрева.

3. Анализ позволил предложить меры, а эксперимент подтвердил, что **совокупность** предложенных мер обеспечивает теплозащиту генераторного диода (диода **Ганна**) при нагреве огневой поверхности датчика до температур более **1000 °C**.

Систематическая температурная погрешность в квазистатическом режиме горения очень велика (до нескольких процентов) Она может быть учтена при вторичной обработке сигнала с использованием установленных в работе аналитических зависимостей.

Флуктуационная, то есть случайная, погрешность имеет специфический спектр. В нем **инфранизкочастотные** флуктуации подавлены автоматикой **энергетической** установки, а более высокочастотные (десятки герц) - тепловой инерционностью тела датчика. Предложены конструктивные меры, использующие последнее свойство для дальнейшего снижения флуктуации.

Динамическая погрешность проявляется при плановом изменении режима энергетической установки. Ее величина и продолжительность во времени затрудняют применение СВЧ датчиков при запуске ЭУ

4. Предложен **усовершенствованный автодинный** датчик для внутри камерной диагностики пламен в энергетических **установках**, в частности, в **ВРД** и **ЖРД**. **Его** конструкция включает биметаллическую антенну и многозвенный резонатор. Сформулированы требования к используемым в конструкции **электротехническим** материалам. Выдвинуты предложения по конструктивным модификациям датчиков для **применения** их при контроле технологических процессов в металлургии, потоковых химических процессов, толщины и качества полимерных пленок и стенок труб в процессе их изготовления при высоких температурах.

Основные **результаты** диссертации **опубликованы** в **следующих** печатных работах:

1. **Boloznev V.V., Safonova E.V.** Diode microwave active oscillator with a multi-link resonator // **Proc. International Symposium on Acoustoelectronics**, Frequency control and Signal generation, June, St.Peterburg, Russia, **1998.-** p. 139-143.
2. **Boloznev V.V., Safonova E.V.,** Microwave oscillator as a sensor of **electrophysics** flow parameters // Proc. Joint meeting of the **13th European frequency and time forum** and **1999 IEEE international frequency control symposium**, **Besancon**, France, **1999.-** p.1062-1066.
3. Сафонова Е.В. **СВЧ-генератор** как датчик электрофизических параметров потока // Сборник докладов III Всероссийская научная конференция «Применение дистанционных радиофизических методов в исследованиях природной среды» **Муром**, Россия, **1999.-**стр. 199-200

4. Болознев В.В., Сафонова Е.В. Выбор электротехнических **материалов** для СВЧ датчиков высокотемпературных технологических потоковых процессов // Межвузовский сборник научных трудов, посвященный 110-летию В.К. Зво-
рыкина, Муром, Россия, 1999.- стр.84-90.
5. Сафонова Е.В., научный руководитель Болознев В.В. Смещение частоты СВЧ Автодина при импульсном нагреве // тезисы докладов шестой междуна-
родной научно-технической конференция студентов и аспирантов: Радиоэлек-
троника, электротехника и энергетика, **Москва**, Россия, март 2000.- стр.22-23.
6. **Safonova E.V.** Minimization of an **autodyne** sensor's error, stipulated by the an-
tenna's heating // **Proc.** Joint meeting of the 14th European **frequency** and time forum
and 2000 IEEE international frequency control symposium **EFTF** Torino, Italy,
2000.- p.241-245.
7. Сафонова Е.В., научный руководитель Болознев В.В. Расчет коэффициента
отражения от щелевой антенны при аномальной температуре // материалы 1 на-
учно-технической конференции студентов и аспирантов. Радиотехнический фа-
культет к 5-летию малой радиотехнической академии, Казань, Россия, 2000.-
стр.10-11.
8. **Boloznev V.V., Safonova E.V.** Determination of the frequency of oscillations in
the **autodyne's** sensor under the regular and casual temperature mode variations //
Proc. 2000 **IEEE/EIA** international frequency control symposium and exhibition,
Kansas, **USA**, 2000.-p.96-99.
9. Safonova E.V. Autodyne sensor for monitoring systems of the processes of
burning // thesis of Scuola **Internazionale** Di Fisica "Enrico Fermi" : "**Recent** ad-
vances in metrology and fundamental constants", **Varena**, Italy, 2000.-p. 164
10. **Boloznev V.V., Safonova E.V.** Autodyne sensors for **internal-combustion** engine
diagnostics // thesis of 2000 International Forum on Wave Electronic and its Applica-
tions, **St.Peterburg**, Russia, 2000, p.96.
11. Safonova E.V., Boloznev V.V. Autodyne microwave sensor of combustion
process: behavior under fast heating // **Proc.** Joint meeting of the 15th European fre-
quency and time forum and 2001 IEEE international frequency control symposium,
Neufchatel, Switzerland, 2001.-p.84-88.
12. Сафонова Е.В. СВЧ **автодинные** датчики с частотным **выходом**// Тезисы
Научной Технической конференции «Автоматика и электронное приборострое-
ние» Казань, **КГТУ**, 2001.-стр.50-51.
13. Safonova E.V. Aggressive Influence on microwave sensor of an **electrophysical**
parameters in flame // IV International Conference for Young Researches Wave Elec-
tronics and Its Applications in Information and Telecommunication Systems,
St.Peterburg, Russia, 2001.-p.28-30.
14. Сафонова Е.В., Болознев В.В. Нагрев антенны как причина погрешности
автодинного датчика // Электронное приборостроение 2001, вып.4(20) Казань
15. Safonova E.V. Microwave sensors of an electrophysical parameters of flames
// Thesis of Joint meeting of the 16th European frequency and time forum and 2002
IEEE international frequency control symposium, St.Peterburg, 2002.-p.109.